فرآیند و دستگاه الکتروهیدروپالس جهت حذف رسوبات مخازن و لوله‌های انتقال نفت و افزایش میزان بازیافت نفت‌خام

فاطمه امیرفرشخواه

محقق ـ مرکز تحقیقات مهندسی آذربایجان‌شرقی ـ پژوهشکده مهندسی وزارت جهادکشاورزی

مهدی چیت‌ساز

مدیر گروه ـ مرکز تحقیقات مهندسی آذربایجان‌شرقی ـ پژوهشکده مهندسی وزارت جهادکشاورزی

چکیده مقاله

امروزه افزایش میزان بهره‌وری چاههای نفت و انتقال بهینهٔ آن یکی از اهداف عمده صنعت نفت کشور می‌باشد که استفاده از فن‌آوریهای پیشرفته همراه با دیدگاه اقتصادی و عملیاتی از راهکارهای اصلی در این زمینه است. رسوبات و مواد آلی سنگین همچون موم‌های نفتی[1] و آسفالتین‌ها[2] یکی از مشکلات بزرگ، پیچیده و مهم صنعت نفت می‌باشد که باعث ایجاد مشکلاتی در عملکرد و بازدهی آن از قبیل : افزایش گرانروی سیال، تغییر خاصیت ترشوندگی[3] سنگ مخزن، افزایش افت فشار مخزن، گرفتگی و کاهش قطر چاه و خطوط لوله انتقال، و در نهایت کاهش و یا توقف تولید و همچنین افزایش هزینه‌ها می‌شوند. به همین علت و براساس همین نیاز، مطالعه‌ای بر روی طراحی، ساخت و تست یک نمونه آزمایشگاهی از دستگاه الکتروهیدروپالس[4] انجام پذیرفت. نمونه طراحی‌شده در واقع نوعی مدولاتور ولتاژ بالا با سوئیچینگ میلی ثانیه‌ای می‌باشد که با تخلیه الکتریکی ولتاژ قوی بصورت پالسی در بین دو الکترود، ایجاد یک نیروی الکتروهیدرولیکی قوی در درون سیال نفت نموده و امواج مکانیکی ناشی از این نیرو، موجب فروریزش و جداشدن جرم و رسوبات دیواره‌ای داخلی چاه، لوله‌های انتقال نفت و همچنین باعث ایجاد گرما و فشار، کاهش چسبندگی و افزایش خاصیت سیلان در مخازن نفت شده و در نهایت ضریب بازیافت نفت‌خام را افزایش می‌دهد.

کلیدواژه‌ها : نفت‌خام، بازیافت، رسوب، الکتروهیدروپالس، تحریک

---

[1] Petroleum wax
[2] Asphaltene
[3] wettability
[4] Electrohydropulse

مقدمه :

وجود مواد جامد در دیواره‌های چاه و لوله‌های انتقال نفت یکی از مهمترین مشکلات و معضلات صنعت نفت کشور ایران می باشد. رسوبات مشکلات عمده‌ای از قبیل : افزایش گرانروی سیال، تغییر خاصیت ترشوندگی سنگ مخزن، کاهش نفوذپذیری روزنه‌های سنگ، افت فشار چاه، کاهش قطر چاه و لوله‌های انتقال را بوجود می‌آورند که به نوبهٔ خود باعث مشکلات مربوط به پمپ کردن سیال و کاهش یا توقف خروجی نفت خام می‌گردند [۱]. دو نوع رسوب اصلی در صنعت نفت عبارتند از آسفالتین و مومها. آسفالتین یا مواد قیری حاوی کربنهای دوده‌ای و گرافیتی هستند که با افزودن یک حلال زودجوش مثل نرمال پنتان رسوب می‌دهند. این مواد در بنزن محلول بوده و از منابع کربنی مانند نفت، زغال سنگ و سنگ‌های نفتی بدست می‌آیند. در طبیعت آسفالتین از اکسیداسیون رزین‌های طبیعی بدست می‌آید و برعکس هیدروژناسیون فرآورده‌های آسفالتین حاوی رزینهای خنثی تولید روغنهای هیدروکربنی سنگین می‌کنند [۲]. وزن مولکولی آسفالتین‌ها از ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰۰۰ تغییر می‌کند. آسفالتین‌ها تنها پس از لخته‌گذاری رسوب می‌کنند. اندازهٔ ذرات پیش از لخته‌گذاری عموماً ۳ تا ۳۵ نانومتر است و پس از لخته‌گذاری، ذراتی به قطر بیش از ۰/۱ میکرومتر تشکیل می‌شوند. لخته‌گذاری آسفالتین‌ها به ترمودینامیک سیستم (دما، فشار، ترکیب) بستگی دارد.

تشکیل آسفالتین‌ها در بستر چاه نفت به سه طریق موجب کاهش تحرک هیدروکربنها می‌شود [۱]:

الف) آسفالتین‌ها بهمراه نفت خام به طرف چاه نفت حرکت کرده و در گلوگاههای روزنه‌های تنگ گیر می‌کنند و بدین ترتیب جلوی حرکت هیدروکربنها را می‌گیرند.

ب) معمولاً دیواره‌های روزنه‌های صخره در مخازن نفتی آب تر هستند. این امر عبور هیدروکربنها را تسهیل می‌کند ولی مواد قیری و آسفالتین‌ها که دارای بار الکتریکی مثبت هستند روی سطح آب تر بهتر جذب شده و آنرا به روغن تر تبدیل می‌کنند و این امر به نوبهٔ خود موجب کند شدن انتقال نفت می‌گردد.

ج) از آنجا که ذرات آسفالتین دارای بار الکتریکی مثبت هستند، مانند یک امولسیون‌کنندهٔ کاتیونی عمل کرده، قطرات آب موجود در بستر را بصورت امولسیون وارد نفت می‌کنند که این امر به نوبهٔ خود موجب افزایش گرانروی و کاهش تولید نفت می‌گردد.

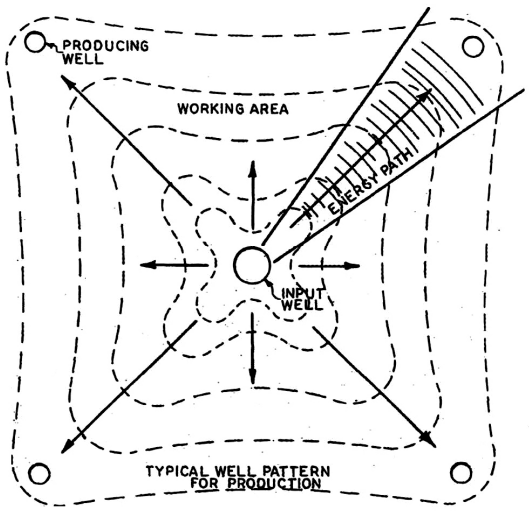
مومهای نفتی نیز که به مخلوط پارافین‌ها، نفتن‌ها با وزن مولکولی بالا (بین $C_{۱۵}$ و $C_{۷۰}$ و سنگین‌تر) اطلاق می‌شوند در پارافینها و آروماتیکهای سبک محلول بوده و با افزایش وزن مولکولی و کاهش دما از میزان حلالیت آنها کاسته می‌شود. این مواد می‌توانند در اثر پائین آمدن دمای مخزن و یا دمای محیط بصورت مواد جامد، رسوب کنند. مومهای نفتی نیز بطور عمده رسوبات دیواره چاهها و لوله‌های انتقال نفت خام را تشکیل می‌دهند [۳].

تاکنون روشهای مختلفی از قبیل روشهای حرارتی، مکانیکی، شیمیایی و غیرفعال به این منظور استفاده می‌شوند. فرآیندهای بازیابی حرارتی که امروزه استفاده می‌شوند به دو گروه عمده تقسیم می‌گردند :

فرآیندهایی که در آنها سیال داغ به مخزن تزریق می‌شود (رانش با حرارت) و آنهایی که حرارت در خود مخزن ایجاد می‌شود که به عنوان فرآیندهای درجا شناخته می‌شوند. روش شیمیایی شامل افزودن مواد جلوگیری‌کننده از رسوب و استفاده از حلالها بوده و روش مکانیکی شامل تراشیدن و ایجاد ضربه می‌باشد. در روش غیرفعال نیز استفاده از مغناطیسهای دایمی یا پالسی و فراصوت مطرح می‌باشد. ولی در روش الکتروهیدروپالس هم مسئله تولید گرما و فشار و هم ایجاد ضربهٔ مکانیکی و فراصوت مطرح است که در قسمتهای بعدی مقاله به تفصیل بحث و بررسی خواهند شد. از آنجائیکه حتی با افزایش یک درصدی ضریب بازیافت نفت، حجم بسیار بزرگی از ذخایر عظیم نفت استحصال خواهد شد، هر گونه تلاشی در این زمینه بسیار با ارزش خواهد بود.

فرآیند الکتروهیدروپالس :

در بازیافت نفت خام با استفاده از فرآیند الکتروهیدروپالس ایجاد یک جرقه الکتریکی قابل انفجار در سطوح زیرین نفتی یا در نزدیکی آنها، باعث تولید امواج ضربه‌ای و امواج هیدرولیکی می‌شود. این امواج با انتشار به سمت سطوح نفتی، باعث حرکت اجباری نفت‌خام به سمت چاههای تولید می‌شوند. انرژی الکتریکی توسط یک بانک خازنی، در کابلهای سرویسهای الکتریکی که در نزدیکی چاهها قرار دارند، ذخیره می‌شود. فاصلهٔ تخلیه بین الکترودها در ابتدا توسط جریان تخلیه بانک خازنی تزریق‌کننده، شکسته می‌شود و بعد از آن یک جریان با دامنهٔ قابل توجه از بانک خازنی اصلی به داخل فاصلهٔ شکست یافته، تخلیه می‌شود و بدین طریق جرقه قابل انفجار تولید خواهد شد نحوهٔ اعمال این انرژی در شکل(۱) نشان داده شده است.



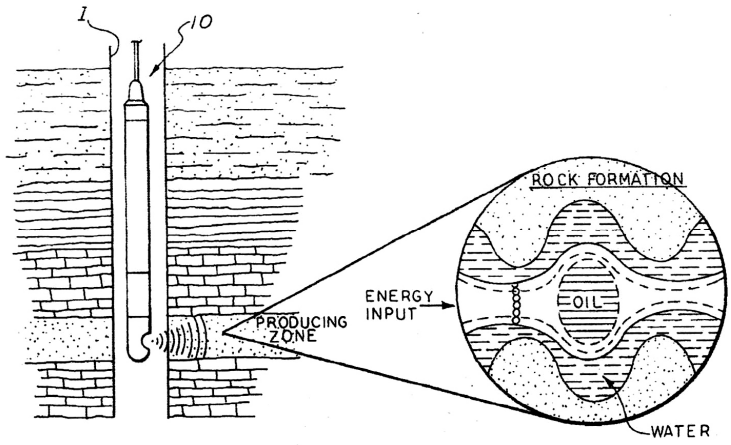
شکل(۱): مسیر انرژی اعمال شده به میادین نفتی [۴]

بیشترین کارآیی این روش در بازیافت نفت خامی است که قابل پمپ شدن یا بازیافت با روشهای فرعی دیگر نیست. در این جا، مهمترین نقش امواج ضربه‌ای و هیدرولیکی وارده به سطوح نفتی، تغییر ساختمان

مولکولی و شکستن باندهای بین مولکولی نفت‌خام و تشکیل مواد و انتشار نفت‌خام از میان این مواد می‌باشد. این امواج صوتی، نفوذپذیری نفت‌خام را هرچه بیشتر می‌کند.

در بازیافت نهایی نفت‌خام، استفاده از محرکهای آبی امکان‌پذیر نیست. زیرا که در این شرایط، لایه‌های آبی فاصلهٔ بین ماسه‌ها، یا کانالهای سوراخ‌دار ساختارها را بسته و باعث محبوس شدن نفت می‌شود. در این هنگام هیچ راهی برای دستیابی به نفت بیان نشده است.

سخت‌ترین کاری که پیش‌بینی می‌شود، بازیافت نفتهای سنگین است. روشهای جدید به بررسی تولیدات نفت‌خام با همهٔ ویسکوزیته‌ها می‌پردازند. چسبندگی نفت و آب به سطوح سنگهای ماسه‌ای، مانع جریان می‌شود. اغلب اوقات در چاههای نفتی هیچ نیروی فشاری که به نفت وارد شود، وجود ندارد و همچنین غلظت نفت اغلب بیشتر از آن است که مهندسین در طراحی در نظر می‌گیرند. بنابراین مطلوب است که نیروی دومی ایجاد کنیم که نفت‌خام را از پایگاه اصلی آن جدا کرده و مواد آزاد را به سمت هسته چاه حرکت دهد. فن‌آوری حاضر می‌تواند موجب افزایش تولید نفت‌خام با همهٔ ویسکوزیته‌ها گردد. این نیروی دوم بایستی توانایی انتشار مؤثر انرژی بر روی یک منطقهٔ زیرزمینی را داشته باشد[۴].

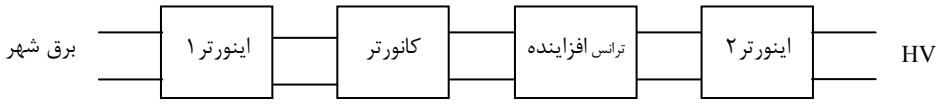


شکل(۲): محل بکارگیری امواج الکتروهیدروپالس [۴]

دستگاه الکتروهیدروپالس:

دستگاه الکتروهیدروپالس طراحی شده در مرکز تحقیقات مهندسی شامل یک منبع تغذیه ولتاژ قوی، مدار یکسوساز، مدار ترانس افزاینده، بانک خازنی پرظرفیت، مدار سوئیچینگ میکروثانیه‌ای و مجموعهٔ الکترودهای تخلیه الکتریکی و ترانسدیوسر و همچنین سیستم‌های کنترل و مانیتورینگ می‌باشد. سیستم منبع تغذیه ولتاژ بالا، با ورودی برق شهر (۲۲۰ ولت متناوب با فرکانس ۵۰ هرتز) دارای خروجی ولتاژ بالای مستقیم در محدودهٔ ۳۰kV-۰ می‌باشد.

بلوک دیاگرام کلی سیستم به صورت زیر است :



شکل(۳) : بلوک دیاگرام کلی سیستم

اینورتر۱ ، شامل مدار یکسوساز در ولتاژ پایین و فیلتراسیون می‌باشد. کانورتر دارای یک اسیلاتور است که سه سیم‌پیچ دارد و علاوه بر تولید نوسان، دامنهٔ ولتاژ را حدود ۲۰ برابر افزایش می‌دهد. همچنین به منظور افزایش دامنهٔ ولتاژ، از یک ترانس پالس استفاده شده است.

اینورتر۲ شامل مدار یکسوساز در ولتاژ بالا می‌باشد که در آن نیاز به پل دیودی با ولتاژ و جریان قابل تحمل بالا است. مهمترین بخش این سیستم قسمت ولتاژ بالای آن می‌باشد. کار در ولتاژ بالا، بعلت تولید جرقه در قسمتهای مختلف سیستم، مشکلات خاص خود را داراست که بایستی موارد لازم رعایت گردد.

سیستم بانک خازنی پرظرفیت نقشی اساسی در ذخیره‌سازی انرژی تولید شده و استفاده به موقع از آن دارد. این بانک خازنی از مجموعهٔ خازنهای سرامیکی موازی تشکیل یافته است و دارای ظرفیت ۱ μF می‌باشد. برای استفادهٔ بهینه از انرژی ذخیره شده در بانک خازنی، بایستی آنرا با فرکانس دلخواه و مناسب سوئیچ کرد. برای این منظور از سوئیچینگ گازی SF_6 استفاده شده است. در انتها مجموعهٔ الکترودها و ترانسدیوسر هدایت‌کنندهٔ امواج آکوستیکی قرار دارند.

مابین الکترود ولتاژ قوی و الکترود زمین یک فاصله جرقه‌زنی وجود دارد که برای تولید امواج ضربه‌ای قوی بکار می‌رود. پارامترهای پالس‌های بکار رفته (دامنه، زمان بالارفت و میرائی و ...) توسط اندوکتانس کابل، ظرفیت خازن و مقاومت‌های محدودکننده کنترل می‌شوند.

کابل تا ولتاژ معینی شارژ می‌شود بطوریکه ولتاژ شکست مایع بین دو الکترود افزایش یابد. سرعت تکرار پالسهای بکار رفته با پالس ژنراتور تغییر می‌کند و همزمانی شارژ ـ دشارژ با یک واحد کنترل عملی به صورت پانل کنترل، کنترل می‌شود. از آنجائیکه نحوهٔ قرارگیری الکترودها بصورت هم‌محور است، اندوکتانس سیستم کاهش می‌یابد و این اجازه می‌دهد که انرژی در کابل ذخیره شود و خیلی سریع در مایع بین الکترودهای زمین و ولتاژ قوی برای ایجاد یک کانال پلاسما تخلیه شود. این انرژی، مطابق جریان اصلی، از مولد پالس در زمان سریع بالارفت پالس، جاری می‌شود و دامنه و کارآیی امواج صوت پالسی را افزایش می‌دهد.

وقتی ولتاژ شکست سیال در فاصله تحریک افزایش می‌یابد، یک کانال پلاسمایی (گاز یونیزه شده) بین الکترودهای زمین و ولتاژ قوی شکل می‌گیرد. گاز داخل حبابی منبسط می‌شود و از این طریق موج‌های صوتی ایجاد می‌شوند.

یک تخلیه ولتاژ بالا در داخل سیال می‌تواند با فاکتورهای گوناگونی تشریح شود که این موارد در بازیافت نفت‌خام و حذف رسوبات اثر می‌گذارند و عبارتند از :

ـ ایجاد پالسهای فشار بالا با دامنه‌ای در حدود ۱۰ مگاپاسکال

ـ ایجاد جریان های مایع ناپایدار و شدید با سرعتی معادل چند صد متر بر ثانیه

ـ ایجاد نوسان‌های شدید

بحث و نتیجه‌گیری :

رسوبها و مواد آلی سنگین مثل مومها و آسفالتین‌ها برای استحصال نفت‌خام یک معضل بزرگ می‌باشند، که باعث اتلاف هزینه‌ها، انرژی و کاهش بازده تولید می‌گردند. برای رفع این مشکل، روشهای مختلفی وجود دارند، لیکن هرکدام کاربردهای محدود و مشکلات خاص خود را دارند. بعنوان مثال، روشهای مکانیکی قابلیت عملکرد در هر مکانی را ندارند و روشهای شیمیایی هم مسئله خوردگی فلزات و مشکلات زیست محیطی را بوجود می‌آورند. پاشش آب یا روغن داغ تحت فشار نیز باعث متوقف شدن سیستم و همچنین بعلل مختلف باعث تولید رسوب مجدد مواد آلی سنگین می‌شود. علاوه بر این میزان آب موجود در نفت خام افزایش می‌یابد که این خود یکی از مشکلات دیگر صنعت نفت می‌باشد [۵] و[٦]. روش الکتروهیدروپالس یکی از روشهای بهینه و جدید برای سیال‌سازی و حذف رسوبات در صنعت نفت می‌باشد. این تکنولوژی بر اساس تخلیه الکتریکی ولتاژ بالا در سیال نفت استوار است که این تخلیه، ایجاد موج ضربتی و جریان هیدرودینامیکی کرده و باعث رانش مولکولهای سیال نفت به اطراف و برخورد آنها به جداره‌های داخلی رسوبی می‌شود. جریان هیدرودینامیکی تولیدشده با سرعت صوت در محیط حرکت می‌کند. فشار ناشی از تخلیه در اطراف الکترود ممکن است به چند مگا پاسکال برسد. اصطکاک ناشی از برخورد مولکولها به همدیگر به هنگام تخلیه، باعث افزایش دمای سیال و ایجاد گرما می شود که این پدیده موجب افزایش خاصیت سیلان و کاهش گرانروی نفت خام می‌شود. برای ایجاد حداکثر ضربه ناشی از تخلیه الکتریکی، بایستی بین الکترودها، توسط یک نازل، قطرات آب تزریق کرد. در این حالت تخلیه طوری صورت می‌گیرد که از هادی آب گذشته ولی انرژی مکانیکی به عایق نفت منتقل شود و این فرایند بازده عملکرد دستگاه را افزایش می‌دهد. علاوه بر این چون الکترودهای این دستگاه داخل نفت خام قرار می‌گیرند و به دور از اکسیژن هستند و آب نیز به داخل سیستم الکترودها تزریق می شود احتمال انفجار یا آتش‌سوزی وجود ندارد و در واقع فقط انرژی مکانیکی به نفت خام منتقل می‌شود.

نتایج حاصل از آزمایشها نشان می‌دهد که :

فشار مکانیکی ایجاد شده به عوامل متعددی از جمله، فاصلهٔ بین الکترودهای فعال و زمین، جنس الکترودها، شدت میدان الکتریکی مابین الکترودها، ولتاژ خروجی دستگاه، بار ذخیره شده در خازنها، ضریب دی‌الکتریک و رسانایی و چگالی نسبی محیط سیال بستگی دارد. در خصوص ارتباط این پارامترها با همدیگر می‌توان گفت که هرچه جنس الکترودها رساناتر و دارای مقاومت بالا در برابر شوک ناشی از جرقه و افزایش دما و فشار مکانیکی باشد نتیجه بهتری حاصل می‌شود. شدت میدان الکتریکی که منجر به حرکت یونها و اعمال فشار به اطراف می گردد، به پارامترهایی نظیر ولتاژ خروجی و فاصله بین الکترودها و خواص رسانایی، دی‌الکتریکی و چگالی نسبی محیط سیال بستگی دارد. بار تخلیه شده و یا بعبارتی جریان خروجی از الکترود فعال نیز به ظرفیت خازنها و توان شارژ منبع تغذیه بستگی دارد. زمان تخلیه نیز به توان سیستم سوئیچینگ وابسته است.

بدیهی است که برای موارد عملی و صنعتی و مقیاسهای واقعی، اجزای دستگاه با توان و کارآیی بالایی طراحی شوند و در آن ولتاژ خروجی، ظرفیت خازنها، منبع تغذیه و سیستمهای سوئیچینگ و کنترل از قابلیت عملکرد در ظرفیتهای بالا و موردنظر برخوردار باشند.

مزایای استفاده از این سیستم عبارتند از :

- عدم صدمه و خوردگی داخل لوله‌ها و مخازن
- تأثیر بر روی انواع رسوبات و مواد آلی سنگین
- راه‌اندازی و سرویس‌دهی آسان
- ابعاد و وزن کم دستگاه
- قابلیت حرکت و انتقال آسان سیستم
- عدم ایجاد مشکلات زیست‌محیطی و بهداشتی
- سرعت زیاد عملکرد سیستم

با در نظر گرفتن مجموعهٔ این مزایا می‌توان از نمونه عملیاتی و صنعتی این دستگاه بطور گسترده در بخشهای مختلف صنعتی کشور استفاده نمود.

مراجع :

1- D.L.katz, k.E.Beu; "Nature of asphaltic subtances ", Industrial and Engineering chemistry; vol. 37, No.2, pp 195-200 , 1995

2-K.J.Leontaritis,J.O.Amaefule,R.F.charles, "A systematic approach for the preventation and treatment for formation caused by asphaltene deposition "; SPE production & Facilities 1994

3- W.B.Pedersen, A.B.Hansen, E.Larsen , A.B.Nielsen; "Wax proecipitation from North Sea crude oils"; Energy & fuels 1991 5, 908-913

4. Richard, H, W, "Process and apparatus for electrohydralic recovery of crude oil" united states patent, Aug 6, 2002, No. 4345650.

۵ـ موسوی دهقانی سیدعلی، وفایی محسن، منصوری غلامعلی، فصیح مهدی، "بررسی آزمایشگاهی اثر تغییر فشار بر حلالیت آسفالتین در مخازن نفتی ایران"، هفتمین کنگرهٔ ملی مهندسی شیمی ایران، ٦-٩ آبانماه ١٣٨١ ، دانشکدهٔ فنی دانشگاه تهران، مجموعه مقالات، جلد سوم، صفحهٔ ٦٠٢-٦٠٣-٦٠٤-٦٠٥

٦ ـ سیدعلیرضا طباطبائی‌نژاد، علیرضا الفت شنب‌غازان، "مدل‌سازی پدیدهٔ تشکیل رسوب واکس در نمونه‌های نفتی ایران و دریای شمال" و هفتمین کنگرهٔ ملی مهندسی شیمی ایران، ٦-٩ آبانماه ١٣٨١، دانشکدهٔ فنی دانشگاه تهران، مجموعه مقالات، جلد سوم، صفحهٔ ٦٦٩-٦٧٠-٦٧١-٦٧٢-٦٧٣